

УДК 621.952.5-529

**О.Н. Дегтярев\*, В.А. Кудрявцев\*\***

\* Одесская национальная академия пищевых технологий, ул. Дворянская, 1/3, г. Одесса, 65082

\*\* Международная промышленная коммерческая компания «Аркадия - 95», 65101, г. Одесса, абонентский ящик 12

**МОДЕРНИЗАЦИЯ СТЕНДА ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НАСОСА**

*После распада СССР сократился объём производства авиационной техники. Актуальными стали задачи создания специальных испытательных и измерительных устройств, применяемых при модернизации и ремонте авиационного оборудования. Целью настоящей работы является модернизация стенда для испытания насоса – составной части гидромеханической системы привод-генератора ГП-21, который служит основным источником электроснабжения на самолётах. Модернизированный стенд обеспечивает поддержание заданной температуры рабочей жидкости в диапазоне 100 – 140 °С с погрешностью  $\pm 5$  °С. В систему регулирования температуры включены ПИД регулятор РПИ-3 и цифровые измерители температуры ИИ фирмы «РегМик» (Черниговская обл.). Система регулирования отлажена непосредственно на объекте и передана заказчику – авиаремонтному предприятию «МИГ ремонт» (г. Запорожье).*

**Ключевые слова:** Измерение – Регулятор – Диапазон – Погрешность – Стенд.

**О.М. Дегтярьов\*, В.О. Кудрявцев\*\***

\* Одеська національна академія харчових технологій, вул. Дворянська, 1/3, м. Одеса, 65082

\*\* Міжнародна промислова комерційна компанія «Аркадія - 95», 65101, м. Одеса, абонентський ящик 12

**МОДЕРНІЗАЦІЯ СТЕНДА ДЛЯ ВИПРОБУВАННЯ НАСОСА**

*Після розпаду СРСР скоротився обсяг виробництва авіаційної техніки. Актуальними стали завдання створення спеціальних іспитових і вимірювальних пристроїв, застосовуваних при модернізації й ремонті авіаційного устаткування. Метою даної роботи є модернізація стенда для випробування насоса – складеної частини гідромеханічної системи привод-генератора ГП-21, який служить основним джерелом електропостачання на літаках. Модернізований стенд забезпечує підтримку заданої температури робочої рідини в діапазоні 100 – 140 °С з погрешністю  $\pm 5$  °С. У систему регулювання температури включені ПІД регулятор РПІ-3 і цифрові вимірники температури ІІІ фірми «РегМік» (Чернігівська обл.). Система регулювання налагоджена безпосередньо на об'єкті й передана замовникові – авіаремонтному підприємству «МІГ ремонт» (м. Запоріжжя).*

**Ключові слова:** Вимір – Регулятор – Діапазон – Погрешність – Стенд.

**O.N. Degtyarev\*, V.A. Kudryavcev\*\***

\* Odessa national academy of food technologies, 1/3 Dvoryanskaya str., Odessa, 65082

\*\* International Industrial Commercial Company "Arcadia - 95", 65101, Odessa, PO Box 12

**PUMP TESTING STAND MODERNIZATION**

*The output of the aircraft equipment was reduced after disintegration of the USSR. Problems of creation of the special test and measuring devices applied at modernization and repair of the aviation equipment became actual. The purpose of the work is modernization of pump test stand – a component of hydromechanical system the ГП-21 drive generator which is the main source of power supply on aircrafts. The upgraded stand provides maintenance of the set temperature of working liquid in the range of 100 - 140 °C with a margin error  $\pm 5$  °C. Into the system of temperature regulation are included PID regulator РПІ-3 and digital temperature gauges ІІІ firm "РегМук" (The Chernigov Region). The system of regulation is debugged directly on the object and transferred to the customer – the aircraft repair enterprise "МІГ-ремонт" (Zaporozhye).*

**Keywords:** Measurement – Regulator – Range – Error – Stand.

## I. ВВЕДЕНИЕ

В условиях резкого уменьшения объёмов производства во многих отраслях промышленности возрастает роль модернизации и восстановления эксплуатируемого оборудования. При этом важная роль отводится созданию специальных испытательных средств. В области модернизации и создания специального испытательного оборудования промышленная компания «Аркадия – 95» работает более 10 лет.

Существующий стенд для испытания насоса был оснащён системой с двухпозиционным регулированием температуры классического типа, где датчик температуры – термометр сопротивления (ТС) включён в плечо измерительного моста, а чувствительным элементом служит поляризованное реле. Такая система не обеспечивала требуемой точности поддержания заданной темпера-

туры во время испытаний насоса. Кроме того, для измерения температуры использовались стрелочные приборы невысокого класса точности, что не удовлетворяло заказчика.

Цель работы – модернизация системы регулирования температуры рабочей жидкости, используемой в гидромеханическом приводе постоянных оборотов генератора переменного тока привод-генератора ГП-21, который является основным источником первичного электроснабжения многих типов самолётов. Диапазон температур рабочей жидкости 40 ... +140°C. Погрешность поддержания температуры в диапазоне 100 – 140 °C не более 10 °C. В данной работе использован регулятор РП1-3 с ПИД - законом регулирования и измерители температуры типа И1 выполненные на микропроцессорной базе. Это недорогие отечественные приборы фирмы «РегМик» (Черниговская обл.).

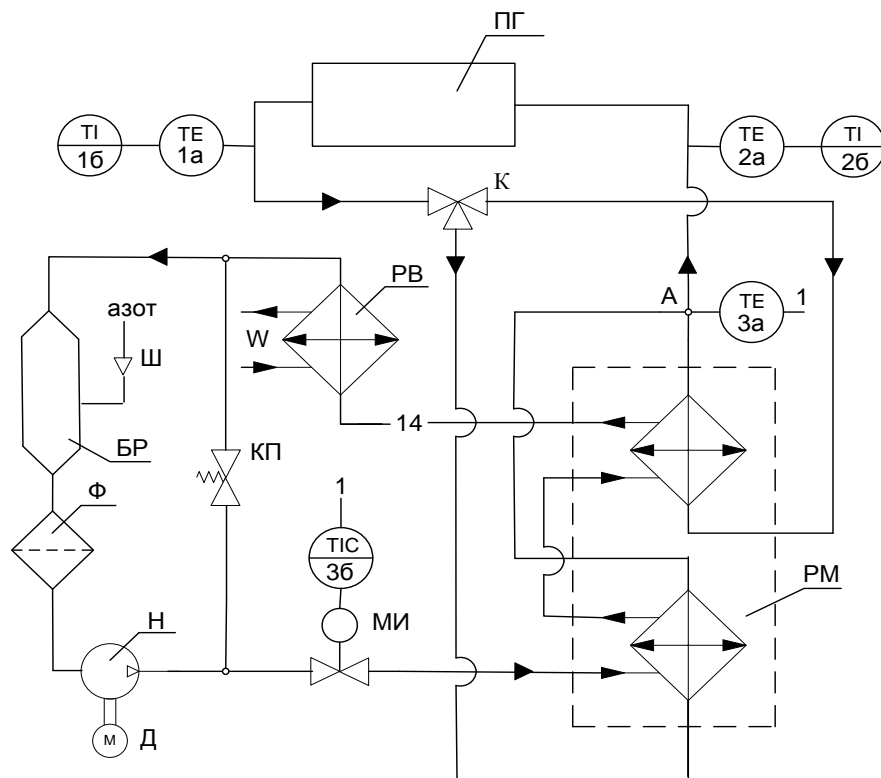


Рисунок 1 – Функциональная схема испытательного стенда

## II. ИСПЫТАТЕЛЬНЫЙ СТЕНД

Упрощённая функциональная схема испытательного стенда приведена на рисунке 1, где обозначено:

ПГ – привод-генератор ГП -21;

РМ – радиатор масляный двухсекционный;

РВ – радиатор водяной;

БР – бак расходный;

Ф – фильтр;

Н – насос с приводным двигателем Д;

КП – клапан предохранительный;

Ш – штуцер заправочный;

МИ – механизм исполнительный типа УР-10;

К – кран трёхходовой;

1а, 2а, 3а – термопреобразователи сопротивления типа ТСМ – 003;

16, 26 – измерители температуры типа И1;

36 – ПИД регулятор температуры типа РП1-3;

А – точка отбора сигнала температуры.

Система охлаждения рабочей жидкости (РЖ) состоит из двух контуров: первый контур содержит радиатор масляный РМ, в котором РЖ охлаждается маслом, второй контур содержит радиатор водяной, где масло охлаждается водой.

Запас масла находится в баке расходном БР под давлением азота. Кран трёхходовой К позволяет изменять расход РЖ в ходе испытаний насоса; при этом используется одна или обе секции масляного радиатора РМ. Измерители 1б, 2б с помощью преобразователей 1а, 2а контролируют температуру РЖ на выходе и на входе насоса. Регулятор температуры 3б управляет однооборотным механизмом исполнительным МИ типа УР-10, а исполнительным устройством служит задвижка. Задвижка содержит золотник с профильным окном относительно фигурного окна корпуса. Регулирование потока масла осуществляется за счёт поворота золотника, форма профильного окна которого

обеспечивает необходимую зависимость проходного сечения задвижки от угла поворота МИ.

Схема управления исполнительным механизмом приведена на рисунке 2, где обозначено: SK1, SK2 – контакты реле регулятора 3б; U1, U2 – оптроны тиристорные типа ТО 125-10; SQ1, SQ2 – конечные выключатели исполнительного механизма; М – реверсивный двигатель исполнительного механизма типа Д12-ТФ с обмотками LM1, LM2; HL1, HL2 – сигнальные лампы; R1, R2 – токоограничивающие резисторы.

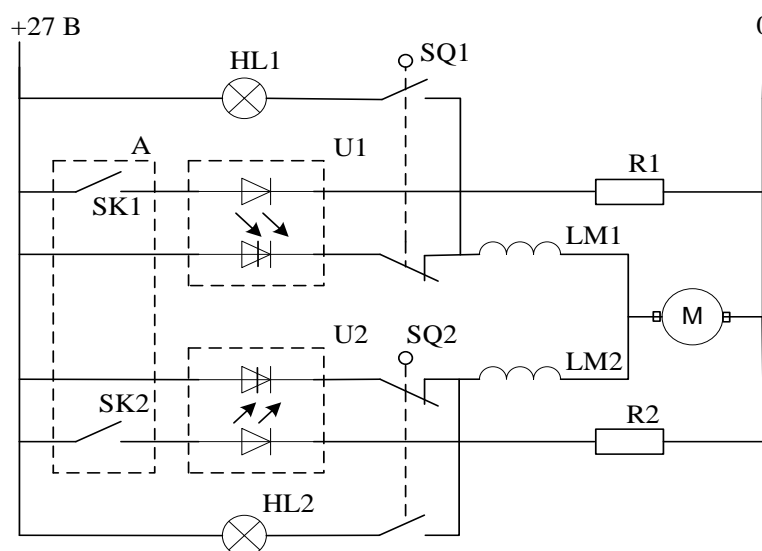


Рисунок 2 – Схема управления механизмом исполнительным МИ

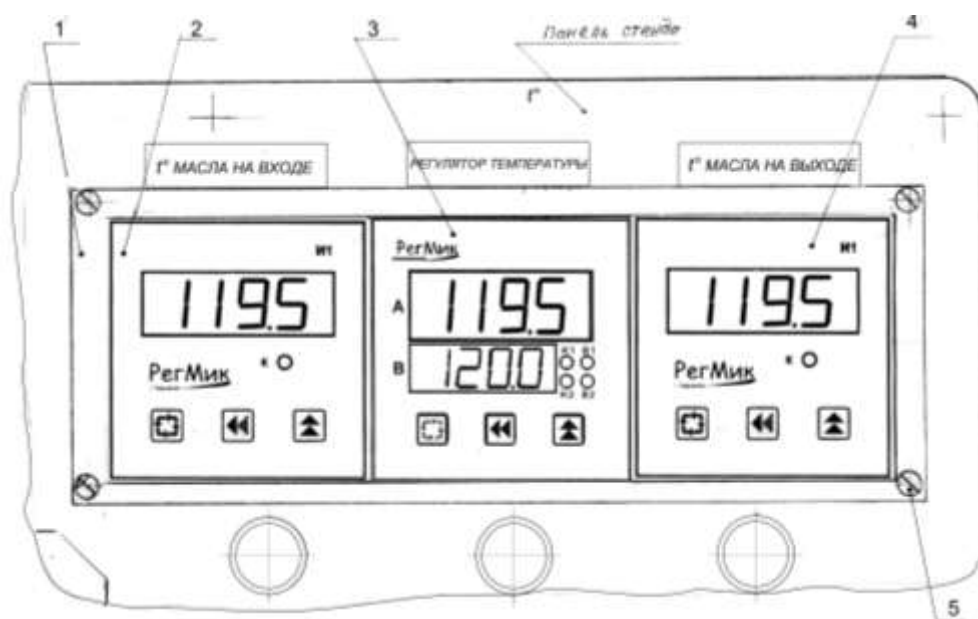


Рисунок 3 – Измерительный блок. Вид спереди

Замыкание контакта SK1 соответствует, например, закрытию задвижки, а замыкание SK2 – открытию. Измерители температуры И1, И2, регулятор температуры РП1-3 и элементы схемы управления размещены в измерительном блоке. Вид спереди измерительного блока показан на рисунке 3, где обозначено:

- 1 – лицевая панель;
- 2 – измеритель температуры РЖ на входе насоса;
- 3 – регулятор температуры;
- 4 – измеритель температуры РЖ на выходе насоса;
- 5 – винты крепления лицевой панели.

### III. ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЪЕКТА РЕГУЛИРОВАНИЯ

Основным критерием при выборе способа регулирования является отношение времени транспортного запаздывания ( $L$ ) к постоянной времени ( $T$ ) объекта. Двухпозиционные регуляторы температуры могут быть с успехом использованы только в системах с малой инерционностью, где отношение  $L/T < 0,1$ .

Для случаев, когда  $L/T = 0,1 \dots 0,5$  удовлетворительное качество регулирования обеспечивает ПИД-регулятор. Однако для объектов с

$L/T > 0,5$  даже применение ПИД - регулятора не всегда обеспечивает хорошее качество регулирования. Для определения динамических свойств объекта была построена кривая разгона (переходная характеристика) – жирная линия на рисунке 4.

Параметры кривой разгона: установившаяся температура рабочей жидкости  $-100^\circ\text{C}$ , начальная температура  $-14^\circ\text{C}$ , время переходного процесса  $-5$  мин. Обработка кривой разгона проведена по методике Зиглера - Никольса. Для этого в точке максимальной скорости изменения выходной величины  $Y$  проводят касательную и продолжают её до пересечения с осью ординат. Ордината точки «с» равна  $Y_c = (100 - 14)(1 - \exp(-1)) + 14 = 68^\circ\text{C}$ .

По рисунку 4 определяем: время транспортного запаздывания  $L = 0,82$  мин = 49 с, постоянную времени объекта  $T = 1,25$  мин = 75 с,  $b = 34^\circ\text{C}$  или  $b = 0,34$  в долевых единицах и  $\text{tg} \alpha = 1 = b/L = K_{oy}/T$ , где  $K_{oy}$  – коэффициент усиления объекта. Значение  $\text{tg} \alpha$  определяем как отношение величин  $b/L$ , измеренных, например, в мм в одинаковом масштабе. Отношение  $L/T = 49/75 = 0,65$ , т.е. объект регулирования характеризуется большим транспортным запаздыванием и большой инерционностью.

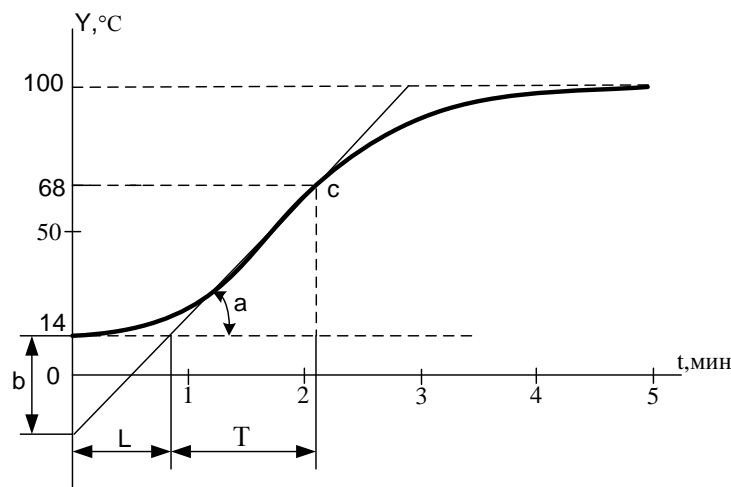


Рисунок 4 – Кривая разгона объекта регулирования

### IV. РЕГУЛЯТОР ТЕМПЕРАТУРЫ РП1-3

ПИД-регулятор позволяет осуществить следующие функции:

- измерение температуры;
- отображение на встроенном светодиодном цифровом индикаторе «А» (зеленого цвета) текущего значения температуры (рисунок 3);
- отображение на встроенном светодиодном цифровом индикаторе «В» (красного цвета) заданного значения температуры (уставки);
- управление электроприводом запорно-регулирующего клапана без учета его положения

(без датчика обратной связи) по ПИД или импульсному закону;

- возможность быстрого изменения заданного значения температуры (уставки для ПИД-регулятора).

При цифровой обработке сигнала ТС ПИД - регулятор прибора вырабатывает управляющий сигнал  $Y$ , действие которого направлено на уменьшение рассогласования. Сигнал  $Y$  рассчитывается по соотношению:

$$Y = \frac{1}{X_p} \left( E_i + \tau_\delta \cdot \frac{\Delta E}{\Delta t_{изм}} + \frac{1}{\tau_u} \sum_{n=0}^{n=i} E_n \cdot \Delta t_{изм} \right) \cdot 100\%$$

где  $X_p$  – коэффициент пропорциональности;

$E_i$  – величина рассогласования;

$\tau_\delta$  – постоянная времени дифференцирования;

$\Delta E$  – разность между двумя соседними рассогласованиями  $E$ ;

$\tau_u$  – постоянная времени интегрирования (время изодрома);

$$\sum_{n=0}^{n=i} E_n \text{ – сумма рассогласований.}$$

Если величина рассогласования по модулю меньше половины зоны нечувствительности (гистерезиса)  $H_{уст}$ , то рассогласование  $E$  принимается равным нулю. За пределами этой зоны значение  $E$  рассчитывается по формуле

$$E = |E_p| - H_{уст}.$$

Выходной сигнал ПИД - регулятора изменяется от -100% до 100% и подаётся на исполнительное устройство УР-10 в виде импульсного сигнала в режиме широтно-импульсной модуляции. Длительность импульсов рассчитывается по формуле

$$D = |Y| \cdot T_{сл} / 100\%,$$

где  $T_{сл}$  – период следования ШИМ - импульсов. При  $Y < 0$  регулятор выдаёт сигнал «закрыть» –

замыкается, например, контакт SK1 (рисунок 2). При  $Y > 0$  выдаётся сигнал «открыть» – замыкается контакт SK2 [1]. Работу регулятора при управлении задвижкой, когда гистерезис равен нулю, иллюстрирует рисунок 5.

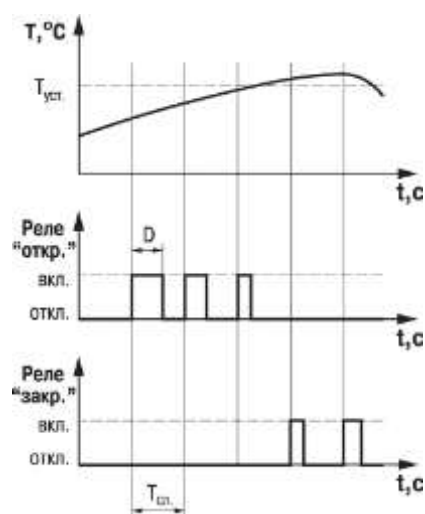


Рисунок 5 – Диаграмма работы выходных реле регулятора при управлении задвижкой

Выходной управляющий сигнал может быть ограничен некоторой заданной величиной Power. Если выходной сигнал прибора превышает заданную величину, то на исполнительное устройство выдается сигнал, равный Power. Изменение выходного управляющего сигнала может быть сглажено цифровым фильтром. Глубина цифрового фильтра задается в параметре «Количество периодов усреднения выходного сигнала».

Таблица 1 – Формулы для расчёта коэффициентов ПИ и ПИД регуляторов

Номер варианта	Авторы предложения	$K$	$T_u$	$T_\delta$
1	Зиглер-Никольс	$0,9/b$	$3L/K$	—
		$1,2/b$	$0,9L/K$	$0,5L/K$
2	CHR, без перерегулирования	$0,35/b$	$1,2L/K$	—
		$0,6/b$	$L/K$	$0,5L/K$
3	CHR, с 20 % перерегулированием	$0,6/b$	$L/K$	—
		$0,95/b$	$1,4L/K$	$0,47L/K$
4	МикРА (г. Киев) без перерегулирования	$0,95T/K_{ov} \cdot L$	$2,4T$	$0,4T$
5	МикРА (г. Киев) с перерегулированием	$1,2T/K_{ov} \cdot L$	$2T$	$0,4T$
6	Обнинская термоэлектрическая компания	$0,95tg\alpha$	$1,3L$	$0,25L$

Примечание к таблице 1: 1) Расчёт по методу Зиглера-Никольса выполнен «по отклику на скачок» [2].  
2) Расчёт по методу CHR выполнен «по отклику на изменение уставки»; CHR (Chien, Hrones, Reswick – группа учёных).  
3) Величины  $b$ ,  $L$ ,  $T$ ,  $tg\alpha$  принимаются по рисунку 4.

Численные значения коэффициентов, рассчитанные по таблице 1, приведены в таблице 2.

**Таблица 2** – Численные значения коэффициентов по таблице 1

Номер варианта	$K$	$T_{u,c}$	$T_{d,c}$
1	2,6	56,5	—
	3,5	12,6	7
2	1	58,8	—
	1,76	27,8	13,9
3	1,76	27,8	—
	2,8	24,5	8,2
4	2,8	180	30
5	3,5	150	30
6	0,95	63,7	12,2

## V. НАСТРОЙКА РЕГУЛЯТОРА

При настройке регулятора необходимо выбрать коэффициенты, к которым относятся:

$K$  – коэффициент пропорциональности;

$T_u$  – постоянная времени интегрирования;

$T_d$  – постоянная времени дифференцирования.

Для расчёта первичных коэффициентов предложено ряд эмпирических формул, приведенных в таблице 1. Все эти формулы выведены для объекта первого порядка с запаздыванием. Заметим, что все авторы, по умолчанию, принимают расположение датчика, в данном случае, термопреобразователя сопротивления, в точке, где необходимо поддерживать температуру, т.е. на входе насоса – в точке расположения датчика 1а (рисунок 1).

Из таблицы 2 видно, что значения коэффициентов для разных вариантов заметно отличаются, особенно, для постоянных времени интегрирования и дифференцирования. Поэтому коэффициенты, приведенные в таблице 2, рассматриваются как первичные, и подлежат уточнению при наладке регулятора на объекте. Регламент испытаний насоса при обкатке содержит три температурных диапазона рабочей жидкости: 1) 90 – 110 °С; 2) 110 – 120 °С; 3) 130 – 140 °С. Задача регулятора таким образом заключается в поддержании температуры рабочей жидкости на входе насоса в указанных пределах в каждом диапазоне. Учитывая, что при смене уставки переход от одного диапазона к другому должен проходить за минимальное время, был выбран режим с перерегулированием. Период следования ШИМ – импульсов был выбран равным  $T_{cl} = 20$  с, т.е. равным времени перемещения задвижки из одного крайнего положения в другое. Отношение

$T_{cl} / L = 20 / 49 = 0,4$  соответствует неравенству  $0,2L < T_{cl} < L$ , рекомендуемому в [3]. Другой

критерий выбора  $T_{cl}$  заключается в проверке неравенства  $T_{уст} / 15 < T_{cl} < T_{уст} / 5$ , где  $T_{уст}$  – время достижения выходным сигналом 95%  $Y_{уст}$

[2]. Принимая  $Y_{уст} = 280$  с, получим  $12 < T_{cl} < 56$ , т.е. величина  $T_{cl} = 20$  с соответствует и этому критерию. Выбранная величина гистерезиса  $Hyst = 2$  °С. При испытаниях регулятора на объекте были опробованы различные варианты выбора коэффициентов по таблице 2. Лучшим оказался вариант №5, однако и он не удовлетворял требованиям заказчика, т.к. погрешность поддержания температуры превышала 10 °С. В ходе последующей наладки установлено, что ввиду малой скорости изменения температуры дифференциальной составляющей можно пренебречь и ПИД-регулятор фактически стал ПИ-регулятором. Заданных результатов удалось достичь при изменении расположения датчика температуры 3а. На рисунке 1 видно, что точка А не совпадает с точкой отбора сигнала для датчика 1а. Фрагмент реального переходного процесса при уставке 100 °С и гистерезисе 2 °С приведен на рисунке 6. При рассогласовании меньше 1 °С работа регулятора блокируется вследствие наличия зоны нечувствительности и текущая температура поддерживается с погрешностью  $\pm 1$  °С. Задание зоны нечувствительности позволяет уменьшить число срабатываний реле регулятора и, соответственно, число включений исполнительного механизма.



**Рисунок 6** – Фрагмент переходного процесса при уставке 100°C и гистерезисе 2°C

## VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенная работа показала, что при управлении разветвлённым объектом с большой инерционностью помимо настройки параметров регулятора, необходимо найти оптимальное расположение датчика обратной связи, которое может не совпадать с обычным расположением в месте, где необходимо поддерживать температуру.

Испытания стенда на объекте показали его работоспособность и удобство в работе. Стенд передан заказчику – предприятию «МИГ ремонт» (г. Запорожье) для эксплуатации.

## ЛИТЕРАТУРА

1. ПИД - регулятор одноканальный РП1-3. Руководство по эксплуатации НПФ «РегМик» (Черниговская обл.).
2. Энциклопедия АСУТП. Интернет издание bookASUTP.ru.
3. Приборы промавтоматики МикРА на сайте [www.micra.com.ua](http://www.micra.com.ua).

## REFERENCES

1. PID – regulator odnokanalnu RP1 -3. Rukovodstvo po ekspluatacii NPF "RegMik" (Chernigovskya obl.).
2. Enciclopedia ASUTP. Internet izdanie bookASUTP.ru.
3. Priboru promavtomatuki MikRA na sayti [www.micra.com.ua](http://www.micra.com.ua).

---

Получена в редакції 09.10.2013, принята к печати 03.12.2013